

二次元測色による現生・化石甲虫翅膀の構造色比較

大藪 雅史・小倉繁太郎*

神戸芸術工科大学大学院芸術工学研究科 〒651-2196 神戸市西区学園西町 8-1-1

Comparison for Structural Color on Existing and Fossil Beetle by Two-Dimensional Spectrocolorimeter

Masashi OHYABU and Shigetaro OGURA*

Kobe Design University Graduate School, 8-1-1 Gakuen-nishi-machi, Nishi-ku, Kobe 651-2196

Recently the mechanisms of structural color have been paid much attention to by researchers and manufacturers. This paper reports the result of the existing and fossil beetles which produce the structural color and strong luster with multilayer structures, adopting a new methodology that can research on the color with both of a macro and micro viewpoints. The instruments used in the experiments were two-dimensional spectrophotometer (measuring area: 40 mm × 40 mm), small area-spectrometer (measuring area: 27 μm^2 or 50 μm^2) and scanning electron microscope. As a result, we can observe a changing color, luster and different characteristics of color between existing and fossil specimens.

Key words: multilayer structural color, existing and fossil beetles, colorimeter

1. はじめに

構造色とは、色素との関連性がありながらも、主として体表面あるいは断面に存在する光の波長と同程度の微細構造によって生じる干渉色や強い光沢である¹⁾。例えば、植物の花弁、真珠・オパール、蝶・蛾、甲虫、魚の鱗、鳥の羽根、アンモナイト等をはじめ、生体での多くの例がすでに知られている^{2,3)}。なかでも甲虫の翅膀は、色彩の美しさと丈夫さ、および退色しないという特性ゆえに、古くはエジプトにおいて紀元前1600年から1100年ごろに装飾品として登場し、珍重されてきた⁴⁾。日本では、玉虫の翅膀を装飾した法隆寺の玉虫厨子が有名である⁵⁾。

さらに近年は、装飾・宝石分野からではなく、各種応用分野（塗装、繊維、化粧品等）から環境にやさしい構造色の発色メカニズムへ注目が高まり、研究が進められている⁶⁾。

Newton⁷⁾に始まる構造色研究の流れや、電子顕微鏡や各種色彩計測機の発展に伴って進展してきた今日の構造色発色メカニズム解析の科学的（物理的、光学的）アプローチについては、小倉・大藪⁸⁾が別に述べたので参照していただきたい。また、昆虫に関する構造色については坂口⁹⁾

が詳細にまとめあげ、現在でも貴重な文献となっている。そのほかには、昆虫生態学の視点から、ディスプレイや擬態等とのかかわりが示され、また生理学的視点からは太陽光選択吸収/反射による体温調整等の考察も行われ¹⁰⁻¹²⁾、近年には、Nassau (1983) や梅鉢 (2000) により構造色を含めた動物の色素に関する著書も出版されている^{13,14)}。

このような背景のもとで、本稿は、構造色研究の一環として甲虫現生/化石標本の、①同一種の現生と化石間の色彩比較（構造色比較）、②近似種間の現生と化石間の色彩比較（構造色比較）、を試みるとともに、③甲虫に現れる構造色の特徴を二次元測色システムおよび微小面積分光計測機を用いて総合的に色彩科学の視点から検討した。

試料としては、構造色について未報告試料であり、典型的な構造色の特徴を示し、かつ現生と化石間で色彩の差異がある2例を選んだ。1つはエゾガムシの現生/化石標本であり、他はチュウゴクオオミズクサハムシ現生標本/ミズクサハムシ属の1種の化石標本である。

2. 方 法

現時点までの先行研究を踏まえ、本稿ではさらに新しい

*E-mail: s-ogura@kobe-du.ac.jp

視点を呈示したい。それは、二次元（試料全体）における色彩把握と微小面積における分光特性把握を基礎とする、色彩の視点からの構造色の検討である。新たな視点を呈示する理由は以下の通りである。

構造色は色素や顔料とは異なり、試料の光の波長と同程度の微細構造によって生じる色彩であるために、試料上に一様に分布せず、各部位に微妙な差異をもって現れる（いわゆるパターンの存在）。さらに、入射角変化に伴う色彩変化という特徴も段階的な現象であり、ある色相から他の色相へは明瞭な境界をもたずに変化する。したがって、試料上の色彩を正確に解析するには、色彩を二次元の広がりで全体的に把握する視点と、可能な限り微小な部位に対しての微視的視点の両データから、総合的に考察していくことが有効であると考えられる。そこで筆者らは、二次元測色システム（全体的視点）と微小面積分光特性計測機（微視的視点）を用いて、構造色を呈する蝶・蛾や甲虫、真珠、アンモナイトなど幾種かの試料について考察を進めてきた^{2,15-21)}。

ここで、二次元測色とは、計測面積最大40 mm×40 mmの試料面に対して1ピクセルあたり（0.1 mm×0.1 mm）の面積ごとに測色を行い、その結果を二次元表示する方法であり、二次元測色システムCI-1040i(MINOLTA)としてはじめて可能となった計測法である。同機では、L*a*b*表色系、L*C*h表色系、XYZ表色系など数種の表示と擬似カラー画像表示が可能である。本稿では、L*a*b*表色系と擬似カラー画像を採用した。

擬似カラー画像とは、L*, a*, b*値の計測数値を任意に色分けし、計測画面にプロットし直したものであり、実際のL*, a*, b*値そのものではなく、それぞれの座標上での微妙な違いを任意の擬似カラーとして改めて表示し直すものである。したがって、擬似カラー画像は、試料上の細かな色彩分布を、例えばL*, a*, b*値それぞれについて詳細に把握するのに最適である。

また、入射角変化に伴う色彩変化を計測するために角度0°, 10°, 20°の3段階の角度変化を萤石のウェッジ（n=1.40）を必要に応じて試料面に設置した。

一方、微小面積分光特性計測は、計測範囲27 μm²、あるいは50 μm²における分光特性計測（ただし、可視域）が可能であり、従来の分光測色で6~8 mm²の試料面積内の平均値を求める方法に比較して、試料内の微小な任意の1点（直径27 μm²または50 μm²）での分光測色が可能となる。同計測は試料上を付属の顕微鏡ステージのX, Y軸で変位させ、現生標本では右翅を上側から、エゾコガムシ化石標本は左側から、ミズクサハムシ属の1種の化

石標本は試料全体の任意点の5か所を計測した。本稿では、レンズ反射率計USPM-RU II(OLYMPUS)を使用した。

さらに、走査型電子顕微鏡を用いて、試料の表面および断面での微細構造の観察を行った。これにより、試料の微細構造と物理的厚み等の把握が可能となる。使用機器は、XL30SFEG(PHILIPS)である。

3. 甲虫翅膀の多様な色彩

一般的に、甲虫は纖維状になっているキチンがタンパク質のスクレオチンでなめされ、プラスチックのように硬い構造の翅膀で覆われており²²⁾、色彩は

- ① pigmentary color (表皮に存在する各種色素による色彩)
- ② structural color (表皮の物理的構造による色彩)
- ③ combination color (①, ②の複合による色彩)

に大別される²³⁾。

この中で、②, ③が色素との関連性がありながらも、主として微細構造によって生じる構造色である。

構造色は主として微細構造が変化しない限り色相を保持する特性があり（ただし、色素との関連が大きければ、色素の変化に伴い色相も変化する）、例えばゾウムシ等は、電子顕微鏡観察のための金コーティングを施しても色相に変化が生じないことがある²⁴⁾。一方、筆者らは、今までの各種計測過程で、構造色の特徴を示す甲虫の現生標本と化石標本間に体色の差異をみてきた。

4. エゾコガムシ現生・化石標本

4万4千年前の地層から産出されたエゾコガムシ *Hydrochara libera* の化石 (Fig. 1) には、色彩変化・虹色・光沢という構造色の特徴があり、翅膀の微細構造が発色に関与している可能性が推測される。しかし、同種の現生標本 (Fig. 2) は、強い光沢のある黒一色で覆われているだけである。

4.1 色彩特性

現生標本では、擬似カラー画像からa*, b*値は高くななく、全体的に無彩色の分布であることがわかる (Fig. 3)。また、角度変化により、L*値(MODE値)が角度0°: 22.57 → 角度10°: 38.65 → 角度20°: 38.70とシフトし、光沢が大きく上昇する。化石標本では、角度0°でb*値(MODE値)が+方向の黄色成分の分布を示し、角度変化により角度0°: 5.76 → 角度10°: -0.01と減退し、角度20°で-1.14と青色成分へシフトする。また、現生標本ほどではないが、角度10°への変化で明度の上昇 (L*値:

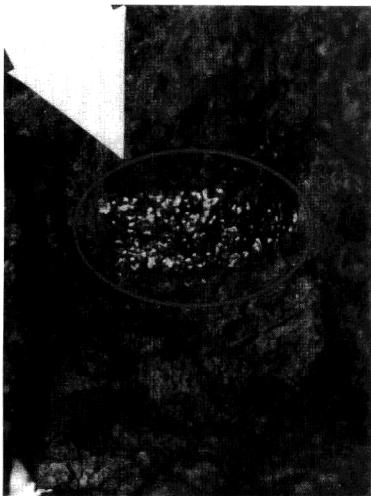


Fig. 1 *Hydrochara libera* (fossil, ≈ 10 mm).

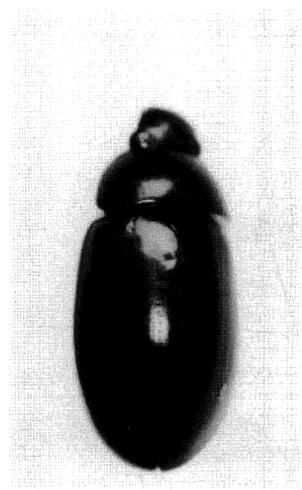


Fig. 2 *Hydrochara libera* (existing, ≈ 9.5 mm).

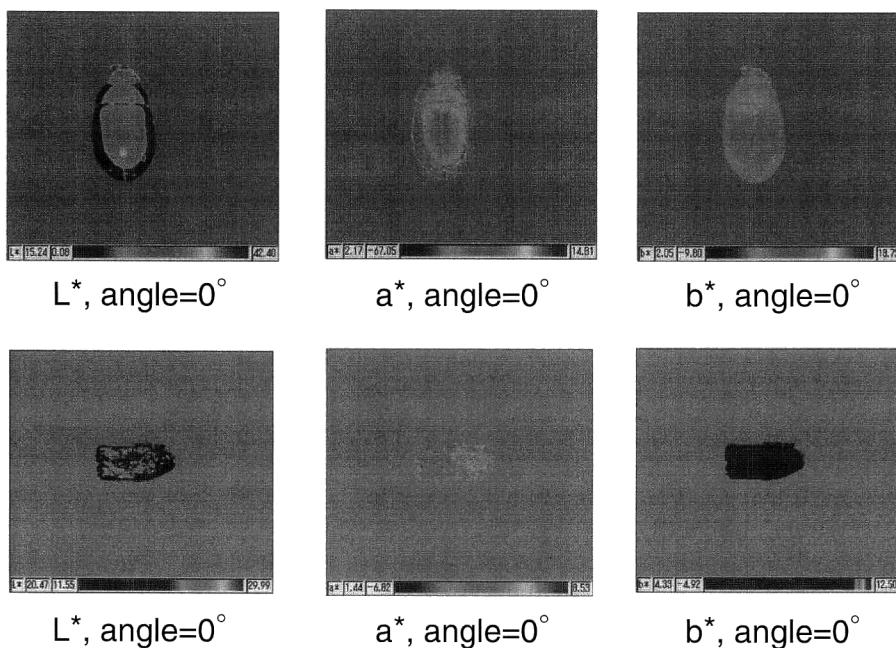


Fig. 3 Data of 2D quasi-color, specimen: *Hydrochara libera* (top: existing, bottom: fossil). left= L^* , center= a^* , right= b^* , angle=0°, CI-1040 i (MINOLTA).

22.06 → 32.40) がみられる²⁰⁾ (Fig. 3).

さらに、微小面積分光特性であるが、現生標本では全体が2%以下の一様に低い反射率であり、特徴としては、計測した試料上の任意点(5点)において一様に380 nmにグラフのピークがみられる (Fig. 4)。

一方、化石標本では、全体的になだらかな変化であるが、計測点2, 4, 5で長波長側(625~683 nm)で反射率1.4~3%以上を示し、現生標本よりも高い反射率を示している。また、同計測点では、短波長側にも高い反射率のピークがみられる(計測点2: 625 nm, 反射率3.05%と380 nm, 反射率2.61%など)とともに計測点ごとに反射率の

ばらつきがみられた (Fig. 5)。

4.2 断面構造

断面構造観察から、エゾコガムシ(現生)の翅鞘の最表層部には約10 μm強のアモルファス層が存在することがわかる (Fig. 6)。

一方、化石標本には、最表層部より約8 μm内に約150層以上(約54 nm/層)の多層構造が観察された (Fig. 7)。

5. チュウゴクオオミズクサハムシ(現生)/ミズクサハムシ属の1種(化石)標本

エゾコガムシの現生および化石標本の各計測から、色彩

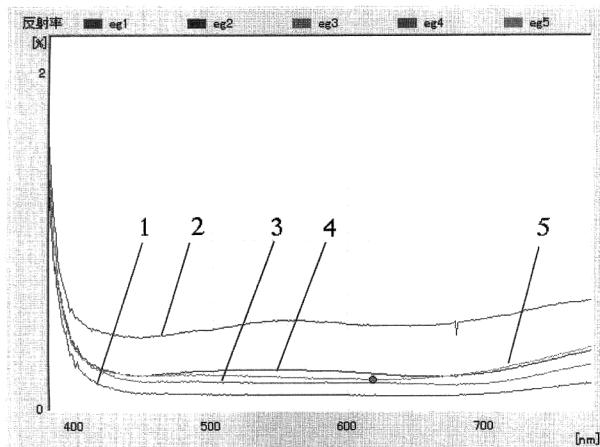


Fig. 4 Small area reflectance for *Hydrochara libera* (existing). measuring area: $50 \mu\text{m}^2$, USPM-RU II.

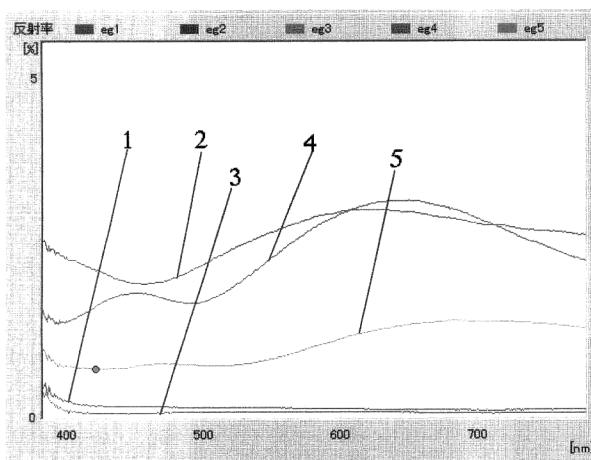


Fig. 5 Reflectance of small area for *Hydrochara libera* (fossil). measuring area: $50 \mu\text{m}^2$, USPM-RU II.

特性/分光分布特性が得られたので、引き続き同機器類を用いてチュウゴクオオミズクサハムシ *Plateumaris constricticollis chugokuensis* (現生標本, Fig. 8) とミズクサハムシ属の1種 *Plateumaris* sp. (化石標本, 4万4千年前, Fig. 9) の各計測を実施した。

チュウゴクオオミズクサハムシ (現生) には、光入射角変化に伴う色彩変化および光沢があり、入手した12頭の色相は任意に3パターン—①銅色、②銅色/緑色、③紫色に分類できた。以下本稿では、その中でも特に光入射角依存性の強い銅色/緑色の試料を用いる。

ミズクサハムシ属の1種 (化石) は光沢のある緑色であり、わずかに光入射角変化に伴う色彩変化が生じる。

5.1 色彩特性

チュウゴクオオミズクサハムシでは、角度変化に伴い a^* 値 (MODE 値) に角度 0° : 4.54 → 角度 10° : 1.05 → 角

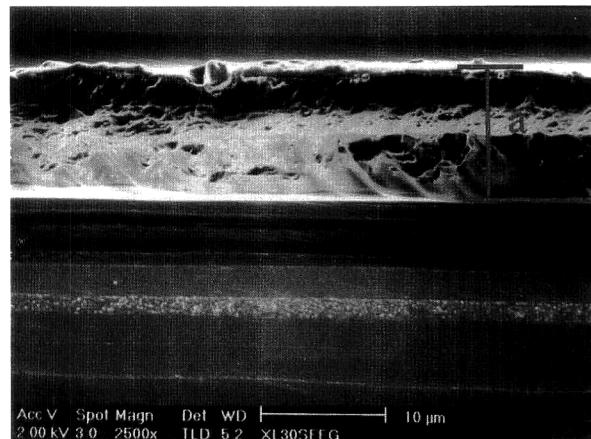


Fig. 6 Cross sectional view of *Hydrochara libera* (existing) by SEM. $\times 2500$, a=amorphous, XL30SFEG (PHILIPS).

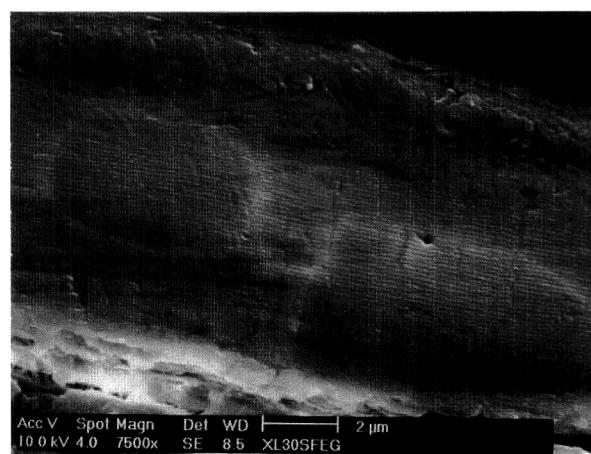


Fig. 7 Cross sectional view of *Hydrochara libera* (fossil). $\times 7500$, XL30SFEG (PHILIPS).

度 20° : 0.52 と、色度の減退傾向が生じる。 b^* 値 (MODE 値) でも角度 0° : 12.69 → 角度 10° : 0.81 と、角度 10° への変化で大きな減退を示すが、角度 20° への変化において角度 20° : 3.03 と色度の黄色方向への再上昇を示す。

ミズクサハムシ属の1種の化石標本では、角度変化に伴い L^* 値 (MODE 値) の上昇がみられる。また、色度に関しては、特に a^* 値 (MODE 値) に角度 0° : -4.01 → 角度 10° : 1.20 → 角度 20° : -0.11 という、緑色味の減退および再上昇があり、中間波長域での変異があった²⁰⁾。

統いて、現生標本の分光特性計測では、全体的になだらかなピークの出現で最大反射率が長波長域 (609~633 nm 内: 最大反射率 8.6%) にみられる (Fig. 10)。一方、化石標本では、5点計測のうち3点 (1, 2, 3) に 380~460 nm の領域 2か所にピークがみられた (計測点 1: 381

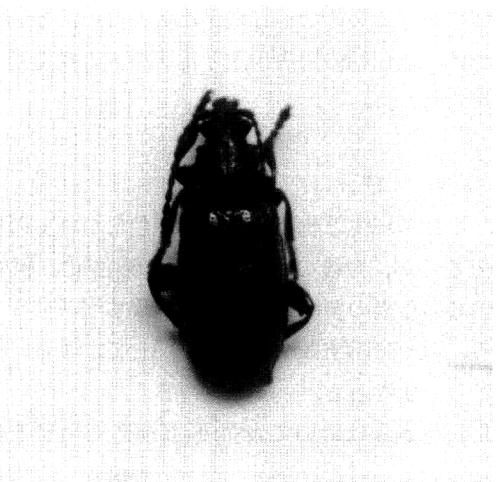


Fig. 8 *Plateumaris constricticollis chugokuensis* (existing, ≈ 7 mm).

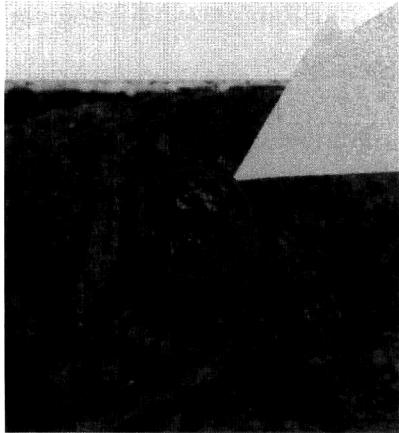


Fig. 9 *Plateumaris* sp. (fossil. ≈ 5 mm).

nm, 1.78%と463 nm, 2.05%など). さらに、計測点1, 3には、780 nmにも反射率の高さがみられ、赤外域への広がりが読み取れる。残りの計測点4, 5は380 nmのみのピークである (Fig. 11).

5.2 断面構造

断面構造観察で、最表部の約5 μm弱内にアモルファス層が確認できた (Fig. 12). 一方、ミズクサハムシ属の1種 (化石) は試料が直径約5 mmと小さく、試料調整等の問題から構造観察に至らず、測色・分光特性計測のみにとどめた。

6. 考 察

エゾコガムシの両試料とともに、特に角度10°への変化に対応する色彩、明度の入射角依存性が示され、構造が発色、光沢に関与することを確認した。

現生標本の二次元測色では、色度において若干の数値変

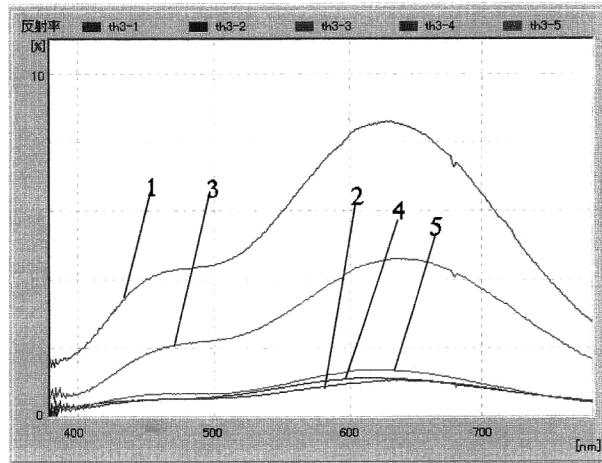


Fig. 10 Small area reflectance for *Plateumaris constricticollis chugokuensis* (existing). measuring area: 50 μm^2 , USPM-RU II.

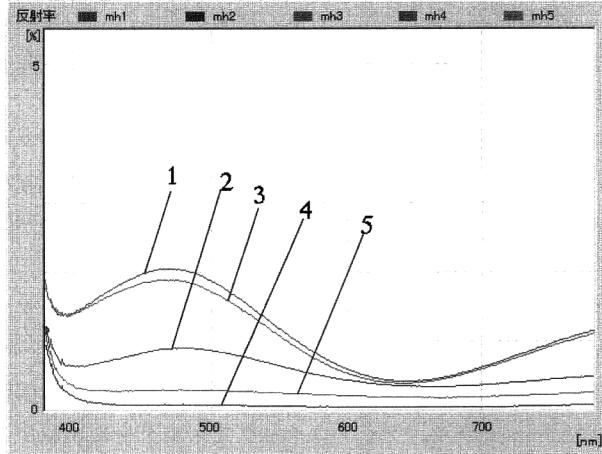


Fig. 11 Small area reflectance for *Plateumaris* sp. (fossil). measuring area: 50 μm^2 , USPM-RU II.

化が現れるが、いずれも彩度の低い位置での変化であり、色度が大きく変動しているとは考えられない。さらに、特定波長を反射する狭帯域フィルターと類似するように、分光特性では380 nmのみ（さらに紫外域への広がりが予測される）のピークを示している。つまり色彩としては、短波長域の反射が多く、主として黒色がみられる。また、構造的に、約10 μm強の体表層部があり、その下部は約2 μmほどの層が続くことを考えると、翅鞘最表層部は光沢を現す反射増加膜を、それ以下は長、中間波長域を吸収する役割を担っている。

一方、化石標本の二次元測色 (b^* 値: MODE 値) の変化や、なだらかではあるが分光特性に短波長域と中間波長域以上でピーク（計測点2: 381 nmと625 nm）が示される部位のあることから、同試料は広帯域に対応する光学特性をもつ多層膜構造である。さらに、化石標本では、二次

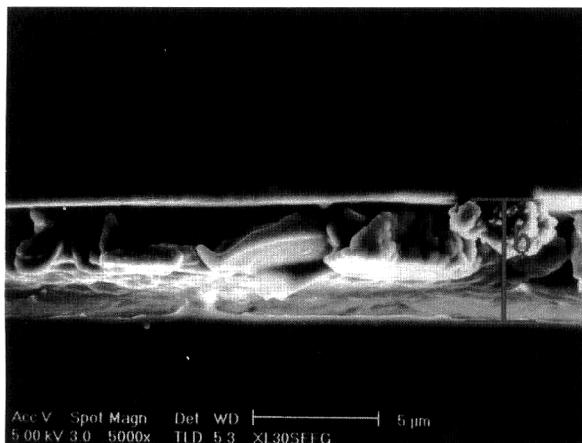


Fig. 12 *Plateumaris constricticollis chugokuensis* by SEM.
b=amorphous, $\times 5000$, XL30SFE (PHILIPS).

元測色の擬似カラー画像における色彩分布のばらつきと同様に計測部位による分光反射率の差異がある。この差異が一因となり、試料上では、構造色の特徴のひとつである「ぎらつき」が現れる。

続いて、チュウゴクオオミズクサハムシおよびミズクサハムシ属の1種でも a^* , b^* 値(MODE値)に角度10°への変化に対応する入射角依存性がみられ、発色に構造が関与することが確認できた。

特にチュウゴクオオミズクサハムシの分光特性グラフには、広帯域の波長に対応するダイクロイックフィルターに類似する特徴が示された。また、ミズクサハムシにも広帯域にピークがあり、ダイクロイックフィルターに類似する特性を示す。さらに、同試料でも試料上の計測部位における反射率の差異が存在し、エゾコガムシと同じく、この差異が構造色特有の「ぎらつき」の一因となる。

7. 結 果

本稿の対象試料である現生/化石標本の比較検討から、①エゾコガムシの現生と化石標本間の色彩的(光学的)、構造的特徴および差異、②チュウゴクオオミズクサハムシ(現生)、ミズクサハムシ属の1種(化石)標本間の構造色の特徴の差異が定量化できた。また、甲虫の構造色に関して、③発色にかかる多層膜構造には、特定波長に対応する狭帯域フィルターに類似する特徴だけでなく、広範囲の波長に対応するダイクロイックフィルターに類似する特徴の存在がわかった。

さらに、二次元測色と微小面積分光特性計測により、試料それぞれの色度、明度の分布、変化、そして入射角依存性の定量化と擬似カラー画像表示による取得データの可視化が可能となり、従来の計測による色彩比較よりも詳細に

試料全体における微妙な色彩変化比較を行い、未同定であった同一種、近似種の甲虫現生と化石標本の構造色を全体的に検討できた。

8. む す び

以上、甲虫の現生と化石標本の構造色についての検討を実施してきたが、今後の課題として、現生/化石標本間における色彩の差異の要因となる構造を現す因子になるとを考えられる、以下に示す3つの原因に関して、さらに検討が必要である。すなわち、

- (1) 化石化過程において表面/断面構造に生じる構造変化について
- (2) 構造構成成分が化石化の過程において他の成分と置換するか否かについて
- (3) 極論となるが、4万4千年前の個体の色彩を現す構造が、長い年月の中で現在の色彩を現す構造へと進化したのかについて

である。

また、他の甲虫現生/化石試料についても計測を実施し、発色に普遍性あるいは種ごとの独自性などが存在するのか否かの検討も必要である。そのためには、特に微細構造を形成している多層膜(交互層)構造での2種類の層の屈折率に関する知見が必要となろう。

これらの課題を踏まえ、今後多くの計測を実施し、詳細な考察を進めていく予定である。

各種現生標本および化石標本を提供していただいたホシザキ野生生物研究所研究員林成多博士、兵庫県立人と自然の博物館研究員八木剛氏、断面構造観察においてご尽力いただいた(株)コベルコ科研加古川事業所中澤純郎氏にお礼申し上げます。

文 献

- 1) W. Folsom著、三宅恒方、内田清之助共訳：昆虫学(警醒社、1911) pp. 302-304.
- 2) 小倉繁太郎：“自然界に存在する格子および多層膜構造による干渉色—真珠、蝶・蛾の鱗粉、および魚の鱗の顕微鏡観察ー”，応用物理，66 (1997) 1330-1334.
- 3) D. Barnson: Ammolite (Selkirk, Manitoba, 1996).
- 4) A. V. Evans, C. L. Bellamy, L. C. Watson著、加藤義臣、廣木眞達訳、小原嘉明監修：甲虫の世界(シュプリングー・フレアーラー東京, 2000) pp. 134-142.
- 5) 石田尚豊：聖徳太子と玉虫厨子(東京美術, 1998) pp. 2-4, pp. 247-250.
- 6) 兵庫県立人と自然の博物館：企画展展示概要(2002) pp. 7-8.
- 7) I. Newton著、島尾永康訳：光学(岩波書店, 1997) p. 231.

- 8) 小倉繁太郎, 大藪雅史：“自然界にみられる構造色”, 光学, **33** (2004) 231-237.
- 9) 坂口浩平:世界の昆虫, 第1巻～第6巻 (保育社, 1980).
- 10) 古知 新:“オオセンチコガネの金属光沢の機能”, 昆虫と自然, **36** (2001) 4-7.
- 11) D. W. Koon and A. B. Crawford: “Insect thin films as sun blocks, not solar collectors,” Appl. Opt., **39** (2000) 2496-2498.
- 12) I. N. Miaoulis and B. D. Heilman: “Butterfly thin films serve as solar collectors,” Ann. Entomol. Soc. Am., **91** (1998) 122-127.
- 13) K. Nassau: *The Physics and Chemistry of Color—The Fifteen Causes of Color*—(A Wiley-Interscience Publication, New York, 1983).
- 14) 梅鉢幸重:動物の色素 (内田老鶴圃, 2000) pp. 255-265.
- 15) 小倉繁太郎：“自然界の構造色—多層膜と回折格子構造—”, 第16回PED研究会 (2001) pp. 1-10.
- 16) S. Ogura and M. Ohyabu: “Structural color in nature and its possible applications for industry,” BMMP 予稿集 (2002) p. 429.
- 17) 大藪雅史：“色彩の芸術工学”, 神戸藝術工科大学大学院修士論文 (2000).
- 18) 大藪雅史, 小倉繁太郎, 中尾光孝：“構造色解析 (1)—測色計への入射角および開口面積依存性”, 第48回応用物理学関係連合講演会予稿集 (2001) p. 1027.
- 19) 大藪雅史, 小倉繁太郎：“構造色解析 (I)—二次元測色システムによる甲虫翅鞘測色—”, 構造色研究会誌, **1** (2001) 29-34.
- 20) 小倉繁太郎, 大藪雅史, 八木 剛, 林 成多：“構造色の解析 (2)”, 応用物理学関係連合講演会予稿集 (2002) p. 995.
- 21) 大藪雅史, 小倉繁太郎：“アンモナイトにおける構造色”, 応用物理学関係連合講演会予稿集 (2002) p. 398.
- 22) 大阪市立自然史博物館：第14回特別展解説書 (1987) pp. 31-32.
- 23) 斎藤哲夫ほか：新応用昆虫学三訂版 (朝倉書店, 2000) pp. 14-16.
- 24) A. Kosaku and K. Miyamoto: “Art of structural coloration in insects,” Forma, **9** (1994) 297-302.